渭河流域植被覆盖变化趋势及其对土壤干湿状况的响应

黄云博， 张 翀， 王玉丹

（宝鸡文理学院地理与环境学院陕西省灾害监测与机理模拟重点实验室，陕西 宝鸡 721000）

摘 要：随着全球气候的快速变化以及渭河流域地区城市的快速发展，渭河流域植被生态系统面临许多挑战，研究区域内植被的时空变化以及对土壤干湿状况的响应有着重要意义。基于2001—2020年的MODIS的归一化植被指数（NDVI）与地表温度（LST）数据，对渭河流域的土壤干湿状况数据进行反演，通过线性回归、残差分析和贡献度分析了2001—2020年渭河流域生长季植被覆盖时空特征及土壤干湿状况的驱动与贡献。结果表明：（1）2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值总体呈现波动增加趋势，平均趋势率为$0.47\times10^{-2}\cdot a^{-1}$，植被呈恢复趋势，其中2012—2016年生长季NDVI均值受到人类活动的抑制作用呈现下降趋势。（2）土壤干湿状况和人类活动对渭河流域生长季NDVI的影响迥异，土壤干湿状况的影响主要表现为影响较弱与缓慢增长，人类活动的影响主要以促进植被恢复为主。（3）土壤干湿状况和人类活动对渭河流域生长季NDVI均值变化的贡献均主要集中于同向贡献，其中负向贡献只来源土壤干湿状况，占比19.77%，同向高贡献主要来源人类活动，说明渭河流域中人类活动是植被覆盖变化的主要驱动力。（4）渭河流域植被整体受到土壤干湿状况和人类活动的双重促进作用；抑制作用主要集中于汾渭盆地农业生态区，属于人类活动的同向高贡献率分布区，说明目前人类活动是抑制植被覆盖增长的主要原因。研究结果可为渭河流域生态保护以及可持续发展提供更加精确的科学依据。

关 键 词：植被变化；土壤干湿状况；人类活动；植被覆盖；残差分析；渭河流域

文章编号：1000－6060(2024)05－0841－09(0841～0849)

21世纪以来，随着气候变化的逐渐加剧和人类活动成为影响全球变化的重要驱动力，自然生态系统所面临的胁迫日趋严重[1]。植被是生态系统的重要组成部分，而流域不仅作为一个具有多种地理要素的生态系统整体，同时更是人类的重点活动区域。渭河作为黄河的主要支流之一，同时内部关中平原城市群是中国重要的农业与经济区，人类活动频繁，紧邻一带一路。因此，掌握流域植被覆盖变化趋势及其对土壤干湿状况的响应，对于了解生态环境质量以及动态演变、预防和治理水土流失有着巨大帮助，同时能够给予黄河流域的综合治理以及生态保护提供经验，对于推动关中平原城市群、一带一路生态文明建设和区域可持续发展具有重要意义。以往研究表明，自然因素和人类活动是影响归一化植被指数（NDVI）变化的重要因子。通常自然因素的选择以气温和降水为主，二者以及人类活动对于NDVI变化的影响均具有两面性[2-6]，均能对植被覆盖变化产生影响，并且在不同区域的影响程度不同。土壤干湿状况是综合多种自然因素的综合体现[7-9]，包括气温、降水和地形等多种因素，与植物的生长关系密切，本文选择土壤干湿状况作为回归模型的因子，同时选择长时间序列的MODIS数据产品用于植被覆盖变化的时空分析，并且对土壤干湿状况和人类活动进行区分和量化。不同区域生态本底存在异质性，时空演变规律和敏感性均有差别，因此结合不同生态区对渭河流域生长季NDVI进行分析，有助于更好地获得不同区域植被对土壤干湿状况和人类活动的响应[10-13]。已有研究发现，

收稿日期：2023-09-07； **修订日期：**2023-10-19

基金项目：陕西省教育厅专项科研计划项目（21JK0477）；陕西省自然科学基础研究计划项目（2021JM-513）资助

作者简介：黄云博（2000-），男，硕士研究生，主要从事资源环境遥感研究. E-mail: h200o1@163.com

通讯作者：张翀（1986-），男，博士，讲师，主要从事资源环境遥感研究. E-mail: zhangch3348@126.com

渭河流域植被覆盖未来整体呈现恢复趋势[14]，对渭河植被分布规律的研究表明不同地区的植被覆盖状况差距较大[15]，但目前渭河流域的研究较少关注于人类活动。

因此，本文基于2001—2020年渭河流域地区的NDVI和地表温度(LST)数据，对土壤干湿状况进行反演，通过一元回归残差分析分离土壤干湿状况变化和人类活动对生长季NDVI的影响，利用变化趋势分析等方法对植被NDVI时空变化特征以及土壤干湿状况和人类活动的影响进行探讨，并评估了2种驱动因素对于生长季NDVI变化的贡献，以期更加精确地为渭河流域生态保护以及可持续发展提供科学依据。

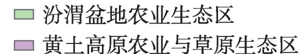
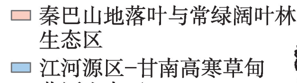
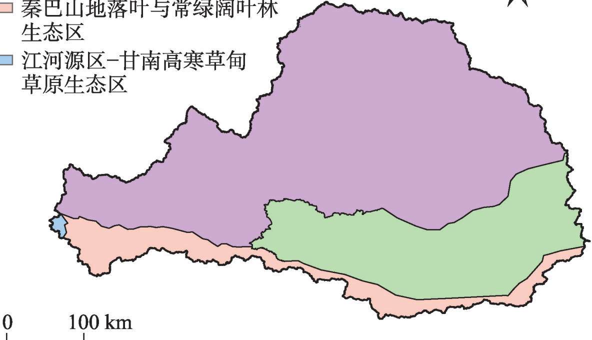




图1 渭河流域生态区划

Fig. 1 Ecological zoning of Weihe River Basin

1 数据与方法

1.1 研究区概况

渭河是黄河最大的支流，发源于甘肃省，流域涉及甘肃、宁夏、陕西3省区，干流全长818 km，流域面积共计13.48×10^4 km²。渭河流域处于干旱地区和湿润地区的过渡地带，降水量变化趋势为南多北少。流域人口分布以关中地区最为密集，流域南北边缘的秦岭山区和黄土高原区，人口分布稀疏。渭河流域共涉及汾渭盆地农业生态区(简称汾渭盆地生态区)、黄土高原农业与草原生态区(简称黄土高原生态区)、秦巴山地落叶与常绿阔叶林生态区(简称秦巴山地生态区)、江河源区-甘南高寒草甸草原生态区(简称江河源区生态区)4个生态大区，其中黄土高原生态区面积最大，生态环境最为复杂；汾渭盆地生态区是人类活动的主要聚集地(图1)。

1.2 数据来源

本文所用数据包括黄土高原2001—2020年的NDVI、LST以及生态区划数据。NDVI数据来自LP-DAAC中的MODIS产品的MOD13A2数据集，空间分辨率为1000 m，时间分辨率为16 d；LST数据来源于MOD11A2，空间分辨率为1000 m，时间分辨率为8 d，由于LST数据存在大量无效数据，因此对其进行重构，同时利用平均值合成法与NDVI数据时间分辨率进行统一，调整为16 d时间分辨率。

1.3 研究方法

1.3.1 数据预处理 对于NDVI数据的处理主要包括坐标转换、数据裁剪、格式转换以及年总值等步骤。其中，年生长季NDVI数据是根据生长季内共13期数据进行求和后平均获得。根据赵杰等[16-17]学者的研究，本文将渭河流域每年4—10月定为植被生长季，并且进一步计算得到生长季NDVI均值等空间数据。

土壤干湿状况(TVDI)数据是利用NDVI与LST数据的梯形特征空间进行计算，相当于是对LST进行最大限度标准化，标准化的上下限随着NDVI的不同发生变化，所以TVDI与NDVI并非同源数据，可以反映出土壤湿度与植被覆盖之间的关系。计算公式如下[18]：

$$\mathrm{TVDI}=\frac{\mathrm{Ts}-\mathrm{Ts}_{\min}}{\mathrm{Ts}_{\max}-\mathrm{Ts}_{\min}} \tag{1}$$

式中：Ts为像元的LST(K)；$\mathrm{Ts}_{\min}$为像元区间内湿边LST(K)；$\mathrm{Ts}_{\max}$为像元区间内干边LST(K)。

1.3.2 变化趋势分析 本文利用Matlab采用一元线性回归方程进行生长季NDVI年际变化趋势的计算，并将线性回归方程的斜率作为NDVI年际变化趋势率[19]。计算公式[20]如下：

$$\mathrm{Slope}=\frac{n\times\sum_{a=1}^{n}\left(a\times\mathrm{NDVI}_a\right)-\sum_{a=1}^{n}a\times\sum_{a=1}^{n}\mathrm{NDVI}_a}{n\times\sum_{a=1}^{n}a^2-\sum_{a=1}^{n}a} \tag{2}$$

式中：Slope为生长季NDVI与时间变量拟合的一元线性回归方程的斜率；n为研究时段年数，本文为20；a为时间变量，取1到n的整数；NDVI_a为第a年的生长季平均NDVI。Slope>0和Slope<0分别表示生长季NDVI随时间递增和递减，Slope的绝对值越大，则说明生长季NDVI变化速度越快。

1.3.3 一元回归残差分析 采用一元回归残差分析方法研究人类活动和土壤干湿状况变化对植被ND-

VI变化的影响[21-22]。该方法主要有以下几个步骤：(1) 基于生长季NDVI以及土壤干湿状况时间序列数据，以NDVI为因变量，土壤干湿状况为自变量，进行回归分析建立一元线性回归模型，计算模型中的各项参数；(2) 基于土壤干湿状况以及回归模型的参数，计算得到NDVI的预测值($NDVI_{PD}$)，用来表示土壤干湿状况因素对于植被NDVI的影响；(3) 计算NDVI观测值与$NDVI_{PD}$之间的差值，即NDVI残差，用来表示人类活动对植被NDVI的影响。计算公式如下：

$$NDVI_{PD} = a \times SM + b \tag{3}$$

$$NDVI_{HA} = NDVI_{OBS} - NDVI_{PD} \tag{4}$$

式中：$NDVI_{PD}$和$NDVI_{OBS}$分别为基于回归模型的NDVI预测值和基于遥感影像的NDVI观测值；a和b为模型参数；SM为对应生长季的土壤干湿状况；$NDVI_{HA}$为残差，即人类活动对NDVI的影响部分。

最后，按照等间隔法对得到的数据进行分类，变化率绝对值小于$0.025 \cdot a^{-1}$的作为影响较弱地区，绝对值在$0.025 \cdot a^{-1}$到$0.1 \cdot a^{-1}$之间的作为缓慢变化，绝对值在$0.1 \cdot a^{-1}$到$0.2 \cdot a^{-1}$之间的作为中速变化，绝对值大于$0.2 \cdot a^{-1}$的作为快速变化。

1.3.4 主要驱动因素对于植被NDVI变化的贡献性 根据变化趋势公式所计算出的$NDVI_{PD}$和$NDVI_{OBS}$的线性趋势率分别代表在土壤干湿状况和人类活动影响下的生长季NDVI变化趋势。趋势率为正表示该因素对植被NDVI的变化起同向作用；反之则表示该因素对植被NDVI的变化起负向作用。为了更好地评价土壤干湿状况和人类活动对于NDVI变化的贡献，对2种因素进行分析。计算公式[19]如下：

$$SEN_{PD} = \frac{Slope_{PD}}{Slope_{OBS}} \tag{5}$$

$$SEN_{HA} = \frac{Slope_{HA}}{Slope_{OBS}} \tag{6}$$

式中：SEN_{PD}为土壤干湿状况变化对于NDVI变化的贡献；SEN_{HA}为人类活动变化对于NDVI变化的贡献；$Slope_{PD}$和$Slope_{HA}$分别为在土壤干湿状况和人类活动影响下的生长季NDVI变化率；$Slope_{OBS}$为生长季NDVI与时间变量拟合的变化率。

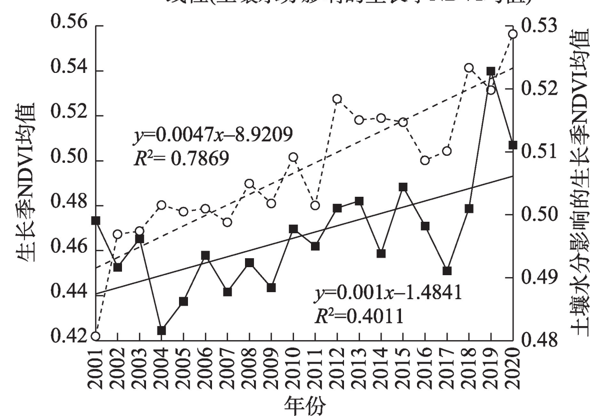
2 结果与分析

2.1 植被NDVI时间变化特征

2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值总体呈现波动增长趋势，但2012—2016年生长季NDVI均值出现明显的下降(图2)。2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值介于0.422~0.557之间，最小值出现在2001年(0.422)，最大值出现在2020年(0.556)，变化率为$0.47\times10^{-2}\cdot a^{-1}$。2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值的直接变化率为$0.71\times10^{-2}\cdot a^{-1}$，说明渭河流域植被处于较好的恢复状态。对2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值变化率进行分段探讨，整体呈现先缓增、再降低、后快速增长的变化情况。

利用土壤干湿状况和人类活动对生长季NDVI数据进行分离，发现土壤干湿状况对应的生长季NDVI均值变化率为$0.1\times10^{-2}\cdot a^{-1}$(图2)，整体的波动范围在0.481~0.523之间，变化率较小。人类活动对应的生长季NDVI均值变化率为$0.47\times10^{-2}\cdot a^{-1}$(图3)，整体的波动范围在-0.090~0.046之间，与渭河流域生长季NDVI均值整体的变化率接近，反映出人类活动对生长季NDVI均值影响较大。对2001—2020年渭河流域土壤干湿状况和人类活动分别对应的生长季NDVI均值变化率进行分段探讨，其中2001—2012年土壤干湿状况对应的生长季NDVI均值变化率为$0.04\times10^{-2}\cdot a^{-1}$，人类活动对应的生长季NDVI均值变化率为$0.54\times10^{-2}\cdot a^{-1}$；2012—2016年





注：NDVI为归一化植被指数。下同。

图2　2001—2020年渭河流域生长季NDVI年际变化以及土壤干湿状况影响的生长季NDVI年际变化

Fig. 2　Interannual variations of NDVI during the growing season and corresponding soil moisture conditions in the Weihe River Basin from 2001 to 2020

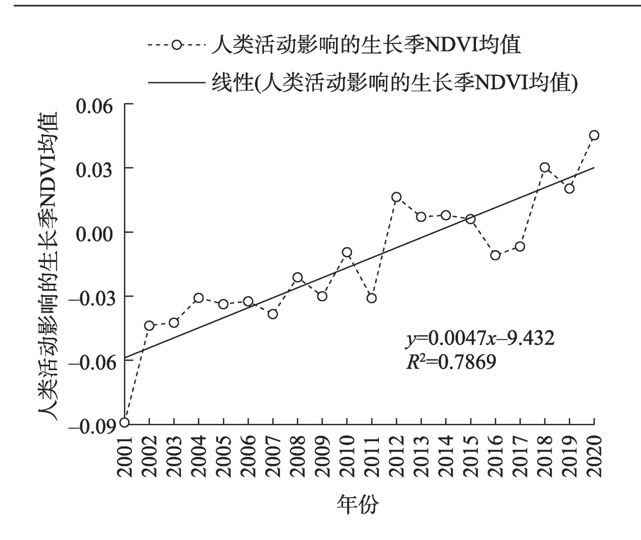


图3 2001—2020年渭河流域人类活动影响的生长季NDVI年际变化

Fig. 3 Interannual variations of NDVI during the growing season influenced by human activities in the Weihe River Basin from 2001 to 2020

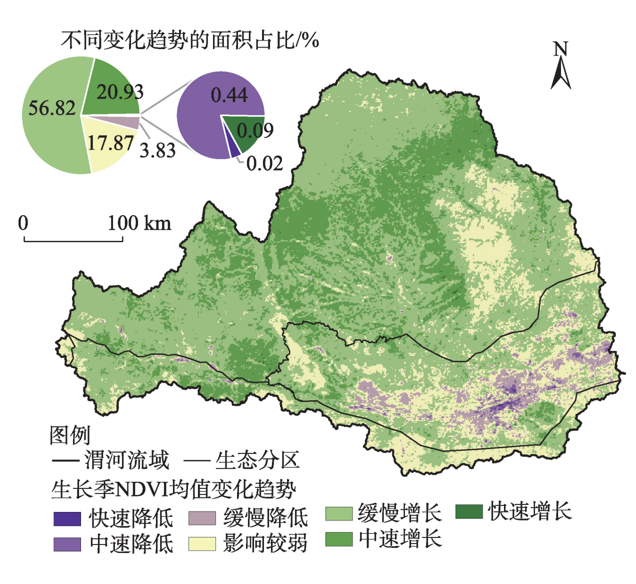


图4 2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of the temporal trends in growing season NDVI mean values in the Weihe River Basin from 2001 to 2020

土壤干湿状况对应的生长季NDVI均值变化率为$-0.03\times10^{-2}\cdot a^{-1}$,人类活动对应的生长季NDVI均值变化率为$-0.56\times10^{-2}\cdot a^{-1}$;2016—2020年土壤水分对应的生长季NDVI均值变化率为$0.58\times10^{-2}\cdot a^{-1}$,人类活动对应的生长季NDVI均值变化率为$1.4\times10^{-2}\cdot a^{-1}$。

2.2 植被NDVI空间变化趋势

2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值变化趋势空间分布差异明显(图4),呈现生长季NDVI均值在渭河中上游部分地区以及渭河流域北部部分地区增长速度较快,在渭河中下游降低速度较快。生长季NDVI均值变化处于减少趋势的面积占渭河流域的4.29%,集中于缓慢降低。生长季NDVI均值处于增长趋势的面积占渭河流域的77.84%,集中于缓慢增长。江河源区生态区生长季NDVI均值变化率为$0.0103\cdot a^{-1}$,影响较弱占自身面积的76.00%;黄土高原生态区生长季NDVI均值变化率为$0.0776\cdot a^{-1}$,大部分地区处于缓慢增长趋势,是生长季NDVI均值呈增长趋势面积最大的生态区,增长趋势的面积占流域增长趋势面积的75.64%;汾渭盆地生态区和秦巴山地生态区以缓慢增长区域为主,生长季NDVI均值变化率分别为$0.0228\cdot a^{-1}$和$0.0470\cdot a^{-1}$。

2.3 植被NDVI的驱动力和贡献度

2.3.1 植被NDVI变化驱动力分析 土壤干湿状况对渭河流域生长季NDVI均值影响较弱,人类活动对生长季NDVI均值主要起促进作用(图5)。土壤干湿状况起促进作用的地区约占流域的21.72%,主要分布于渭河流域上部;人类活动起促进作用的地区约占流域的74.58%,主要位于渭河流域中部以及北部地区,尤其是渭河流域的陕北地区;人类活动抑制生长季NDVI均值的地区集中于渭河流域的中下游。

统计不同生态区土壤干湿状况和人类活动对渭河流域生长季NDVI均值变化的影响面积占比(表1)。黄土高原生态区中土壤干湿状况引起的生长季NDVI均值变化率为$0.0170\cdot a^{-1}$,是土壤干湿状况促进生长季NDVI均值增长最明显的地区,也是中速增长的主要分布区;江河源区生态区、汾渭盆地生态区和秦巴山地生态区受土壤干湿状况影响较弱。江河源区生态区中,人类活动引起的生长季NDVI均值变化率较小,为$0.0082\cdot a^{-1}$;黄土高原生态区、汾渭盆地生态区和秦巴山地生态区集中于缓慢增长,黄土高原生态区人类活动引起生长季NDVI均值的变化率为$0.0606\cdot a^{-1}$,是人类活动促进生长季NDVI增长最高的地区;汾渭盆地生态区是人类活动抑制生长季NDVI均值最明显的地区,占全部抑制地区面积的93.80%

2.3.2 不同因素对NDVI变化的贡献度分析 渭河流域土壤干湿状况对生长季NDVI均值变化的贡献率集中分布在0%~25%部分(图6),同向高贡献率

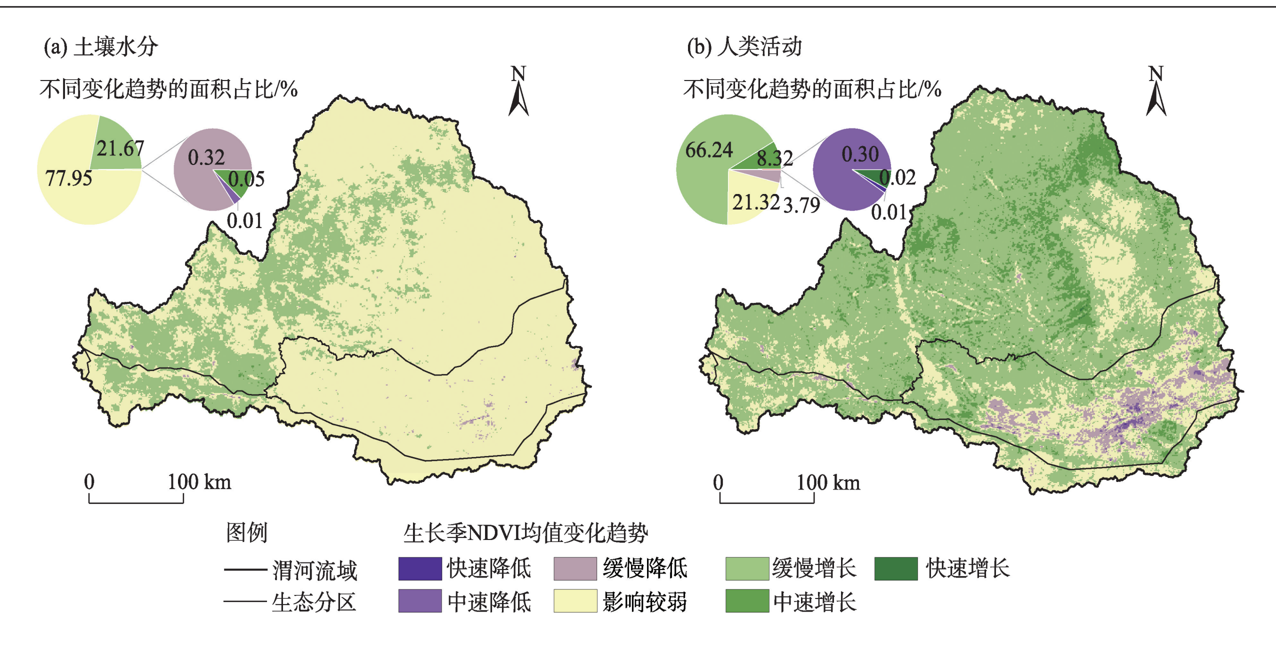


图5 2001—2020年土壤干湿状况和人类活动对渭河流域生长季NDVI均值变化的影响

Fig. 5 Impacts of soil moisture conditions and human activities on the interannual changes in growing season NDVI mean values in the Weihe River Basin from 2001 to 2020

表1 2001—2020年渭河流域各生态区生长季NDVI均值的不同影响状况面积占比

Tab. 1 Area proportion of different influential conditions on the growing season NDVI mean values in various ecological zones of the Weihe River Basin from 2001 to 2020

/%

生长季NDVI均值变化趋势	总体				土壤水分				人类活动			
	江河源区生态区	黄土高原生态区	汾渭盆地生态区	秦巴山地生态区	江河源区生态区	黄土高原生态区	汾渭盆地生态区	秦巴山地生态区	江河源区生态区	黄土高原生态区	汾渭盆地生态区	秦巴山地生态区
快速降低	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
中速降低	0.00	0.01	0.41	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00
缓慢降低	0.01	0.14	3.54	0.14	0.00	0.03	0.26	0.03	0.00	0.11	3.54	0.14
影响较弱	0.19	6.13	8.26	3.29	0.24	46.43	24.09	7.19	0.21	8.50	8.55	4.06
缓慢增长	0.05	40.40	11.07	5.30	0.00	18.65	0.32	2.70	0.03	49.22	11.45	5.54
中速增长	0.00	18.39	1.37	1.17	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	7.31	0.83	0.18
快速增长	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00

地区集中于渭河流域的西部，负贡献区域约占流域的19.77%，负向贡献率较高的区域散落分布在渭河中下游地区和渭河流域东部。渭河流域人类活动对生长季NDVI均值变化的贡献均为同向，集中分布在75%~100%部分，约占整个流域的50.81%，同向高贡献率地区分布于渭河中下游地区以及渭河流域东部。

统计渭河流域不同生态区土壤干湿状况和人类活动对生长季NDVI均值变化的贡献(表2)。其中，江河源区生态区土壤干湿状况主要表现为同向贡献，占自身面积的78.26%；黄土高原生态区是土壤干湿状况贡献率大于75%的主要分布地区；汾渭盆地生态区是土壤干湿状况负向贡献率自身占比最高的地区，达到了34.52%；江河源区生态区和黄土高原生态区人类活动的贡献率主要布在75%~100%，黄土高原生态区人类活动贡献率0%~75%占到了此贡献率地区的76.76%。汾渭盆地生态区是人类活动对生长季NDVI变化贡献最大的区域，贡献率大于75%的地区面积占自身约89.56%。

3 讨 论

2001—2020年渭河流域植被恢复较好，时间变化上呈现先缓增、再降低、后快速增长的趋势，研究

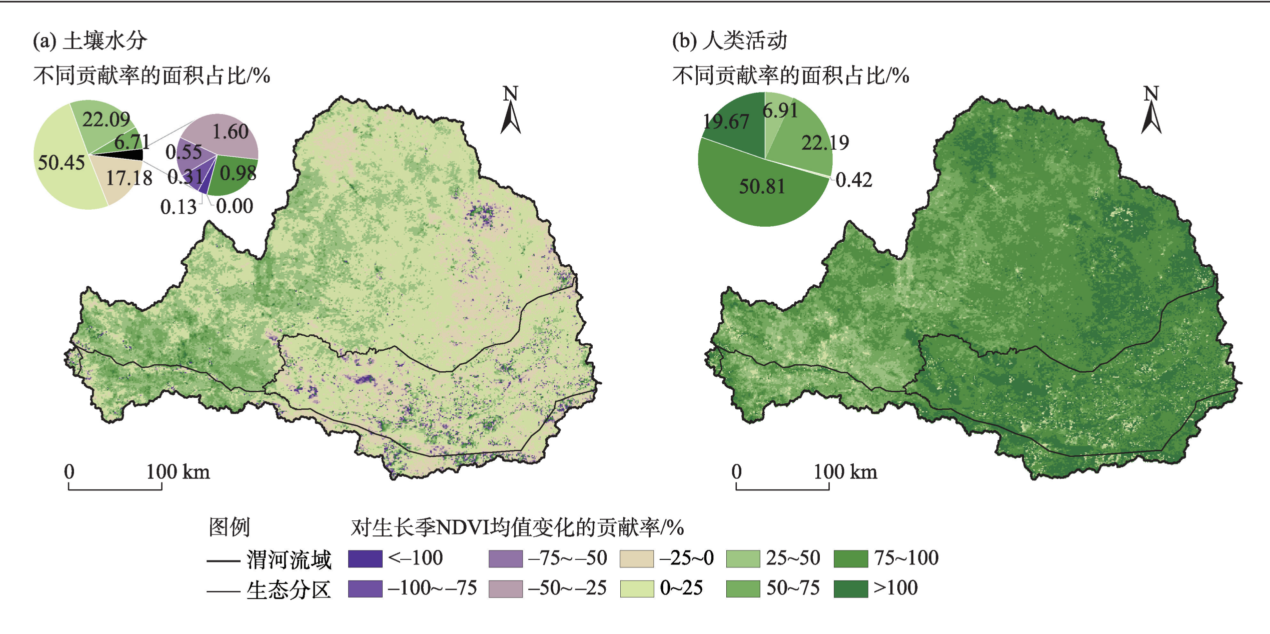


图6　2000—2020年渭河流域不同因素对生长季NDVI均值变化的贡献率

Fig. 6　Contribution rates of different factors to the interannual changes in growing season NDVI mean values in the Weihe River Basin from 2000 to 2020

表2　2001—2020年渭河流域各生态区不同贡献率的面积占比

Tab. 2　Area proportion of different contribution rates of each ecological region in the Weihe River Basin from 2001 to 2020

/%

贡献率/%	土壤水分				人类活动			
	江河源区生态区	黄土高原生态区	汾渭盆地生态区	秦巴山地生态区	江河源区生态区	黄土高原生态区	汾渭盆地生态区	秦巴山地生态区
<-100	0.00	0.02	0.07	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00
-100~-75	0.00	0.06	0.18	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00
-75~-50	0.00	0.14	0.30	0.11	0.00	0.00	0.00	0.00
-50~-25	0.01	0.44	0.83	0.32	0.00	0.00	0.00	0.00
-25~0	0.04	7.79	7.15	2.20	0.00	0.00	0.00	0.00
0~25	0.09	34.10	13.43	2.84	0.00	0.24	0.07	0.10
25~50	0.06	17.45	2.01	2.57	0.02	4.89	0.50	1.50
50~75	0.02	4.73	0.52	1.44	0.06	17.53	2.01	2.59
75~100	0.01	0.51	0.22	0.24	0.09	34.18	13.68	2.87
>100	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	8.48	8.45	2.68

发现分离后的人类活动引起的生长季NDVI均值变化率与生长季NDVI均值分段直接变化率极为接近，说明渭河流域人类活动对于2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值的变化起主导作用。因此，2012—2016年渭河流域生长季NDVI均值的下降应该是由于人类活动的城市扩张导致植被覆盖区域减少[23]。

本研究主要关注了渭河流域植被覆盖对土壤干湿状况的响应，发现植被覆盖受到土壤干湿状况和人类活动的共同作用，其中人类活动对于生长季NDVI均值变化的影响更为明显。植被覆盖受到多种因素的共同影响[24-25]，渭河流域的植被恢复可能是由于21世纪以来地表温度的上升[26]加速了土壤有机质的分解和营养元素的释放，从而促使植被加速成长[27]；另一方面，高质量的保护工程等人类活动极大的促进了植被恢复[28]，对于渭河流域北部的影响尤为显著。同时，由于人类活动对于土地利用格局的改变，加上城市地区植被覆盖本身较少，因此人类活动对于大城市群地区的植被NDVI均值的抑制较为严重。由此可以看出，土壤干湿状况和人

类活动纵横交错的复杂影响对渭河流域植被NDVI均值变化的空间分布差异具有决定意义[29]。所以剥离植被动态变化的自然因素与人类活动对于渭河流域的植被恢复以及生态保护具有重要的意义。

同时渭河流域植被覆盖存在明显的空间分异。结合生态区进行进一步讨论,生态区的生长季NDVI均值整体恢复都较好。4个生态区中生长季NDVI均值的变化排序由大到小为黄土高原生态区、秦巴山地生态区、汾渭盆地生态区、江河源区生态区。江河源区生态区面积仅占整体渭河流域的0.25%,分布在渭河流域最西部,受到土壤干湿状况的抑制作用较为轻微,受人类活动的影响较大,植被恢复情况良好。黄土高原生态区作为渭河流域最大的生态区植被恢复远好于其他生态区,是生长季NDVI均值呈增长趋势分布最多的地区,主要是由于人类活动的促进作用,例如通过大量的人类保护工程促进黄土高原生态区的植被恢复。汾渭盆地生态区靠近人类活动城市群,生长季NDVI均值受人类活动抑制十分严重,且渭河中下游的关中城市地区受人类活动影响很大,因此汾渭盆地生态区生长季NDVI均值的整体恢复情况较差。秦巴山地生态区分布于渭河流域南部,受到的土壤干湿状况的影响植被NDVI均值恢复较好,加上良好的人类活动工程保护[30],植被恢复情况仅次于黄土高原生态区。

4 结 论

(1) 2001—2020年渭河流域生长季NDVI均值总体呈现波动增加趋势,平均变化率为$0.47\times10^{-2}\cdot a^{-1}$,其中2012—2016年生长季NDVI均值受到人类活动的抑制作用呈现下降趋势,植被恢复整体较好。2001—2020年渭河流域生长季NDVI变化趋势主要集中于缓慢增长,空间分布差异明显,其中汾渭盆地生态区是生长季NDVI降低趋势分布最多的地区,生态区中NDVI的变化排序由大到小为黄土高原生态区、秦巴山地生态区、汾渭盆地生态区、江河源区草原生态区。

(2) 土壤干湿状况和人类活动对渭河流域生长季NDVI的影响迥异,土壤干湿状况的影响主要表现为影响较弱与缓慢增长,人类活动则主要以促进植被恢复为主。人类活动对生长季NDVI的抑制作用主要分布在汾渭盆地生态区,黄土高原生态区的生长季NDVI受到土壤干湿状况和人类活动共同促进作用。

(3) 土壤干湿状况和人类活动对渭河流域生长季NDVI均值变化的贡献均主要集中于同向贡献,其中负向贡献只来源土壤干湿状况,占比19.77%,同向高贡献主要来源人类活动,说明渭河流域中人类活动是植被覆盖变化的主要驱动力。因此,在渭河流域生态恢复过程中应该更加关注人类活动。

(4) 渭河流域植被整体受到土壤干湿状况和人类活动的双重促进作用。抑制作用主要集中于汾渭盆地生态区,属于人类活动的同向高贡献率分布区,说明目前人类活动是抑制渭河流域植被覆盖增长的主要原因。

参考文献(References)

[1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis[C]//Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for Policymakers. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.

[2] Shi S Y, Yu J J, Wang F, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes over multiple timescales on the Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142419, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.142419.

[3] Han J J, Wang J P, Chen L, et al. Driving factors of desertification in Qaidam Basin, China: An 18-year analysis using the geodetector model[J]. Ecological Indicators, 2021, 124: 107404, doi: 10.1016/j.ecolind.2021.107404.

[4] Venkatesh K, John, R, Chen J Q, et al. Optimal ranges of social-environmental drivers and their impact on vegetation dynamics in Kazakhstan[J]. Science of the Total Environment, 2022, 847: 157562, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.157562.

[5] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 等. 自然因子对四川植被NDVI变化的地理探测[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1758-1776. [Peng Wenpfu, Zhang Dongmei, Luo Yanmei, et al. Influence of natural factors on vegetation NDVI using geographical detection in Sichuan Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1758-1776.]

[6] 徐勇, 郑志威, 郭振东. 2000—2020年长江流域植被NDVI动态变化及影响因素探测[J]. 环境科学, 2022, 43(7): 3730-3740. [Xu Yong, Zheng Zhiwei, Guo Zhendong, et al. Dynamic variation in vegetation cover and its influencing factor detection in the Yangtze River Basin from 2000 to 2020[J]. Environmental Science, 2022, 43(7): 3730-3740.]

[7] Li W T, Migliavacca M, Forkel M, et al. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture[J]. Nature Communications, 2022, 13: 3959, doi: 10.1038/s41467-022-31667-9.

[8] Miguez-Macho G, Yang F. Spatiotemporal origin of soil water taken up by vegetation[J]. Nature, 2021, 598: 624-628.

[9] 拉巴, 边巴次仁, 拉珍, 等. 青藏高原土壤水分时空变化特征及

其与气候变化的关系研究[J]. 高原科学研究, 2023, 7(1): 1−8. [La Ba, Bianba Ciren, La Zhen, et al. Spatiotemporal variation characteristics of soil moisture and its relationship with climate change on the Qinghai-Tibet Platea[J]. Plateau Science, 2023, 7(1): 1−8.]

[10] Jiang L L, Jiapaer Guli, Bao A M, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017, 599/600: 967−980.

[11] Meng X Y, Gao X, Li S Y, et al. Spatial and temporal characteristics of vegetation NDVI changes and the driving forces in Mongolia during 1982—2015[J]. Remote Sensing, 2020, 12(4): 603, doi: 10.3390/rs12040603.

[12] 耿庆玲, 陈晓青, 赫晓慧, 等. 中国不同植被类型归一化植被指数对气候变化和人类活动的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(9): 3557−3568. [Geng Qingling, Chen Xiaoqing, He Xiaohui, et al. Vegation dynamics and its response to climate change and human activities based on different vegation types in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(9): 3557−3568.]

[13] 吴楠, 陈凝, 程鹏, 等. 安徽省各生态分区的NDVI年际变化特征及归因分析[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(6): 1200−1207. [Wu Nan, Chen Ning, Cheng Peng, et al. Analysis on characteristics and attribution of NDVI interannual change in different ecological divisions in Anhui Province[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2023, 32(6): 1200−1207.]

[14] 庞家泰, 段金亮, 张瑞, 等. 2000—2019年渭河流域植被覆盖度时空演变特征及气候响应[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 230−237. [Pang Jiatai, Duan Jinliang, Zhang Rui, et al. Characteristics of spatial-temporal evolution and climate response of vegetation cover in the Wei River Basin from 2000 to 2019[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 230−237.]

[15] 王丽霞, 张珈玮, 孟妮娜, 等. 基于CA-Markov的渭河流域NDVI时空变化模拟及预测[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 206−212. [Wang Lixia, Zhang Jiawei, Meng Nina, et al. Simulation and prediction of temporal and spatial changes of NDVI in the Wei River Basin based on CA-Markov[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 206−212.]

[16] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2−3): 213−224.

[17] 赵杰, 杜自强, 武志涛, 等. 中国温带昼夜增温的季节性变化及其对植被动态的影响[J]. 地理学报, 2018, 73(3): 395−404. [Zhao Jie, Du Ziqiang, Wu Zhitao, et al. Seasonal variations of day- and night-time warming and their effects on vegetation dynamics in China's temperate zone[J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(3): 395−404.]

[18] 张翀, 雷田旺, 宋佃星. 黄土高原植被覆盖与土壤湿度的时滞关联及时空特征分析[J]. 生态学报, 2018, 38(6): 2128−2138. [Zhang Chong, Lei Tianwang, Song Dianxing. Analysis of temporal and spatial characteristics of time lag correlation between the vegetation cover and soil moisture in the Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(6): 2128−2138.]

[19] 金凯, 王飞, 韩剑桥, 等. 1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 961−974. [Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 961−974.]

[20] Wang F, Ge Q S, Wang S W, et al. 2015: A new estimation of urbanization's contribution to the warming trend in China[J]. Journal of Climate, 2015, 28(22): 8923−8938.

[21] 陈淑君, 许国昌, 吕志平, 等. 中国植被覆盖度时空演变及其对气候变化和城市化的响应[J]. 干旱区地理, 2023, 46(5): 742−752. [Chen Shujun, Xu Guochang, Lü Zhiping, et al. Spatiotemporal variations of fractional vegetation cover and its response to climate change and urbanization in China[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(5): 742−752.]

[22] 张春森, 胡艳, 史晓亮. 基于AVHRR和MODIS NDVI数据的黄土高原植被覆盖时空演变分析[J]. 应用科学学报, 2016, 34(6): 702−712. [Zhang Chunsen, Hu Yan, Shi Xiaoliang. A analysis of the spatial-temporal evolution of vegetation cover in the Loess Plateau in recent 33 years based on AVHRR NDVI and MODIS NDVI[J]. Journal of Applied Sciences, 2016, 34(6): 702−712.]

[23] Evans J, Geerken R. Discrimination between climate and human-induced dryland degradation[J]. Journal of Arid Environments, 2004, 57(4): 535−554.

[24] 文妙霞, 何学高, 刘欢, 等. 基于地理探测器的宁夏草地植被覆被时空分异及驱动因子[J]. 干旱区研究, 2023, 40(8): 1322−1332. [Wen Miaoxia, He Xuegao, Liu Huan, et al. Analysis of the spatiotemporal variation characteristics and driving factors of grassland vegetation cover in Ningxia based on geographical detectors[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(8): 1322−1332.]

[25] 刘玉婷, 张齐飞, 刘景时, 等. 近20 a新疆南部植被覆盖度时空特征及对气候因素的响应——以塔什库尔干塔吉克自治县为例[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1481−1489. [Liu Yuting, Zhang Qifei, Liu Jingshi, et al. Temporal and spatial characteristics of fractional vegetation coverage and its response to climatic factors in southern Xinjiang in recent 20 years: A case of Taxkorgan Tajik Autonomous County[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1481−1489.]

[26] Wessels K J, Prince S D, Malherbe J, et al. Can human-induced land degradation be distinguished from the effects of rainfall variability? A case study in South Africa[J]. Journal of Arid Environments, 2007, 68(2): 271−297.

[27] 李净, 刘红兵, 李彩云, 等. 基于GIMMS 3g NDVI的近30年中国北部植被生长季始期变化研究[J]. 地理科学, 2017, 37(4): 620−629. [Li Jing, Liu Hongbing, Li Caiyun, et al. Changes of green-up day of vegetation growing season based on GIMMS 3g NDVI in northern China in recent 30 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(4): 620−629.]

[28] Xin Z, Xu J, Zheng W. Spatiotemporal variations of vegetation cover on the Chinese Loess Plateau (1981—2006): Impacts of climate changes and human activities[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2008, 51(1): 67-78.
[29] Zhao A, Zhang A, Liu X, et al. Spatiotemporal changes of normalized difference vegetation index (NDVI) and response to climate extremes and ecological restoration in the Loess Plateau, China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2018, 132: 555-567.
[30] 邓晨晖, 白红英, 高山, 等. 秦岭植被覆盖时空变化及其对气候变化与人类活动的双重响应[J]. 自然资源学报, 2018, 33(3): 425-438. [Deng Chenhui, Bai Hongying, Gao Shan, et al. Spatial-temporal variation of the vegetation coverage in Qinling Mountains and its dual response to climate change and human activities[J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(3): 425-438.]

Change trend of vegetation cover and its response to soil moisture status in Weihe River Basin

HUANG Yunbo, ZHANG Chong, WANG Yudan
(Shaanxi Key Laboratory of Disaster Monitoring and Mechanism Modeling, School of Geographic & Environmerntal Sciences, Baoji University of Arts and Sciences, Baoji 721000, Shannxi, China)

Abstract: With the rapid global climate change and the swift urban development in the Weihe River Basin, the vegetation ecosystem in this region faces numerous challenges. Investigating the spatiotemporal changes in vegetation and their response to soil moisture conditions is crucial. Utilizing normalized difference vegetation index (NDVI) and land surface temperature (LST) data from MODIS for the years 2001 to 2020, this study inverted the soil moisture conditions in the Weihe River Basin, northwest China. Through linear regression, residual analysis, and contribution analysis, we thoroughly examined the spatiotemporal characteristics of vegetation cover during the growing seasons and the driving factors and contributions to soil moisture conditions from 2001 to 2020. The results indicate: (1) During the period from 2001 to 2020, the overall trend of the growing season NDVI mean values in the Weihe River Basin exhibited a fluctuating increase, with an average trend rate of $0.47\times10^{-2}\cdot a^{-1}$. The vegetation showed a recovery trend. However, during the years 2012 to 2016, the growing season NDVI mean values experienced a declining trend, attributed to the inhibitory effect of human activities. (2) The impact of soil moisture conditions and human activities on the growing season NDVI in the Weihe River Basin diverged significantly. The influence of soil moisture conditions primarily exhibited a relatively weak and slow growth effect, while the impact of human activities was mainly characterized by promoting vegetation recovery. (3) The contributions of soil moisture conditions and human activities to the changes on the growing season NDVI mean values in the Weihe River Basin were mainly concentrated in the same direction. Negative contributions, accounting for 19.77%, were solely attributed to soil moisture conditions. On the other hand, positive contributions, indicating higher influence, primarily originated from human activities. This suggests that human activities are the primary driving force behind vegetation cover changes in the Weihe River Basin. (4) The overall vegetation in the Weihe River Basin is influenced by a dual promotion from both soil moisture conditions and human activities. Inhibitory effects are primarily concentrated in the agricultural ecological zone of the Fenwei Basin, which corresponds to a high contribution rate from human activities in the same direction. This suggests that current human activities are the main factor inhibiting the growth of vegetation cover. This study can provide a more accurate scientific basis for ecological conservation and sustainable development in the Weihe River Basin.

Key words: vegetation change; soil moisture status; human activities; vegetation cover; residual analysis; Weihe River Basin